干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

# 大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的关系

邱德勋[1,2]， 穆兴民[1,2,3]， 尹殿胜[4]， 高 鹏[1,2,3]

（1. 中国科学院水土保持研究所，黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 西北农林科技大学，黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，
陕西 杨凌 712100；4. 中水淮河规划设计研究有限公司，安徽 合肥 230601）

**摘 要**：基于标准化降水指数（SPI）方法，对1971—2017年大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的联系进行了分析。结果表明：(1) 不同时间尺度SPI对降水量变化的敏感程度不同，SPI1和SPI3适用于短期气象旱涝特征的识别，而SPI6和SPI12对揭示区域长期旱涝影响及持续时间效果较好。2种时间尺度SPI（SPI3和SPI12）的时间变异性均呈显著增加趋势。(2) 不同季节SPI的变化趋势和干旱等级频次存在差异，仅冬季有一定的下降趋势，其余季节呈增加趋势，秋季最显著。年SPI波动幅度较大，总体上呈增加趋势，2001年以来最明显。干旱等级均以轻旱和中旱为主（21.2%~36.1%），夏、秋季发生干旱的频率最高。(3) 干旱事件持续时间呈不显著的减少趋势，长时间尺度干旱事件平均持续时间、最长持续时间以及下降速度均大于短时间尺度。(4) 降水集中程度增大会导致SPI1减小，增加干旱发生的可能性。典型极端降水可能会降低干旱发生的概率。

**关 键 词**：降水；干旱；标准化降水指数（SPI）；大理河流域
**文章编号**：

干旱是全球范围内普遍发生的一种自然灾害，具有出现频率高、持续时间长、波及范围广、后延影响大的特点[1]。干旱易造成水资源短缺，导致粮食减产，严重影响社会经济发展[2]。据统计，全球每年因干旱造成的经济损失远远超过其他自然灾害[3]。在全球气候变暖的背景下，极端天气频发，干旱发生的频率、强度以及持续时间都处于增加趋势[4]。作为我国主要的农业气象灾害之一，干旱导致的受灾面积约占气象灾害总受灾面积的60%以上，居各气象灾害之首[5]。目前，对于干旱的定义尚未统一[6]。通常认为干旱大致可以分为4类[7]，即气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱。长时间的气象干旱会引起农业干旱和水文干旱，进而导致社会经济干旱。及时监测和评估干旱状况对于预防和治理干旱具有十分重要的意义。干旱指数实现了对干旱的定量化分析，是监测、评估和研究干旱的基本依据和有效工具[8]。由于建立依据和途径不同，干旱指数种类繁多且各有侧重[9]。目前，应用较多的主要有降水量距平百分比、相对湿润指数、土壤相对湿度指数、$Z$指数、帕默尔干旱指数、标准化降水指数（Standard precipitation index，SPI）等单项干旱指数以及综合气象干旱指数（如DM、CI等）[10-13]。其中，Mckee等[14]于1993年提出的SPI，采用$\Gamma$函数的标准化降水累积频率分布来描述降水量变化，表征某时段降水量出现的概率。SPI能够监测和评估不同时间尺度的干旱，对干旱变化反映敏感，时空适应性较强，且计算只需输入降水量数据，资料易获取[5]。研究表明，具有30 a以上的降水系列即可用来估计SPI参数[14]。近年来，国内外学者利用SPI已开展了大量研究工作。Seiler等[15]利用SPI监测阿根廷科尔多瓦省南部的常发性洪水，证明了SPI作为区域系统的气候概率监测工具有很好的代表性。翟禄新等[16]研究得出SPI作为一种干旱重建指标，适用于西北地区，也可作为气候变化的

**收稿日期**：2020-09-21； **修订日期**：2021-01-28
**基金项目**：国家重点研发计划专题计划(2016YFC0501707)
**作者简介**：邱德勋（1997-），男，研究生，硕士，主要从事水土保持与流域生态水文研究. E-mail: qiudexun97@163.com
**通讯作者**：高鹏（1976-），男，博导，研究员，主要从事水土保持与流域生态水文研究. E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

监测指标。在流域尺度下，基于SPI对淮河[17]、汉江[18]、闽江[19]、渭河[20]、塔里木河[21]、石羊河[1]等流域干旱现象及演变特征的研究，证实其对干旱的反应灵敏，能够满足不同水资源状况分析的要求，具有较好的现实意义。

位于黄河中游的无定河流域地处西北内陆地区，而大理河是无定河最大的一级支流，流域涉及陕西省的榆林和延安2市，主要为黄土丘陵沟壑区，属典型温带、暖温带半干旱大陆季风气候，生态环境脆弱。特殊的地理条件和气候特征导致大理河流域旱涝灾害频发，直接威胁当地农作物的生长发育，对水资源的开发利用和社会经济发展产生不利影响。鉴于当前针对大理河流域旱涝演变特征的研究鲜有报道，本文采用SPI作为定量评价指标着重对近47 a大理河流域气象干旱的变化特征及其与极端降水的联系进行了分析，以期为减轻当地干旱灾害损失和合理利用水资源提供科学依据。

# 1 研究区、数据与方法

## 1.1 研究区概况

大理河位于陕西省北部（109°14′~110°13′E，37°30′~37°56′N），是无定河最大的支流，干流全长170 km，流域面积3906 $km^2$。大理河发源于靖边县南部的白于山东侧，自西向东流经榆林市的靖边、横山、子洲3县，至绥德县城附近注入无定河。流域约有83%的面积为黄土丘陵沟壑区，地形支离破碎，植被稀疏，水土流失严重。流域属于典型大陆性季风气候区，多年平均气温为7.8~9.6 ℃，多年平均降水量约470.0 mm，年径流量为$1.83\times10^8$ $m^3$左右。

## 1.2 数据来源

本文选用大理河流域青阳岔、曹坪、李家河和绥德4个水文站的1971—2017年逐月降水量资料进行分析，数据均来源于水利部黄河水利委员会《黄河流域水文资料年鉴》。利用回归替代法对部分年份缺测数据进行插补，以保证其连续性。所有数据均经过一致性检验与处理。

## 1.3 研究方法

参照Mckee等[14]的干旱等级标准，并根据干旱等级标准增加了雨涝划分等级（表1）。SPI具有多时间尺度特征（1、3、6、12、24个月等，分别表示为SPI1、SPI3、SPI6、SPI12、SPI24等）。本文主要分析对象为不同时间尺度的SPI（SPI1、SPI3、SPI6、SPI12）、年SPI（基于年降水量）和季节SPI（春季为3—5月，夏季为6—8月，秋季为9—11月，冬季为12月—次年2月）。采用Mann-Kendall（M-K）非参数检验法进行年序列趋势检验。使用5 a滑动标准差方法[22-23]分析SPI的时间变异性。以历年SPI变化过程的拟合直线斜率的10倍表征SPI年代变化趋势率[4]。基于游程理论，进一步分析干旱事件的持续时间，取0作为游程的截断水平[25]，SPI≤0代表发生一次干旱事件，定义一次干旱事件的名称为从开始到结束所跨越年份[1]。SPI值及M-K检验均采用Matlab 2018a软件编程计算，图表用Origin 2017和Excel 2010绘制。

表1 基于标准化降水指数（SPI）的旱涝等级

Tab. 1 Drought and flood grades based on the standard precipitation index (SPI)

| SPI | 旱涝等级 | SPI | 旱涝等级 |
|---|---|---|---|
| −1.0<SPI≤−0.5 | 轻旱 | 0.5≤SPI<1.0 | 轻涝 |
| −1.5<SPI≤−1.0 | 中旱 | 1.0≤SPI<1.5 | 中涝 |
| −2.0<SPI≤−1.5 | 重旱 | 1.5≤SPI<2.0 | 重涝 |
| SPI≤−2.0 | 特旱 | SPI≥2.0 | 特涝 |

# 2 结果与讨论

## 2.1 年降水量变化特征

大理河流域1971—2017年的年降水量及累积距平变化见图1，距平基准期为1981—2010年。多年平均降水量为464.0 mm，最大值为2014年的699.5 mm，最小值为2000年的303.6 mm，波动幅度较大，差值达到395.9 mm。M-K趋势检验统计值为2.35（通过0.05显著性水平检验），表明年降水量有显著的增加趋势。累积距平曲线显示降水量具有明显的阶段性特征，以20世纪90年代中期为分界，之前呈波动变化，变幅相对较小；之后经历了先下降后上升的变化过程，拐点出现在2005年。对大理河流域近47 a来不同月份降水量的变化过程分析显示（图2a~b），降水量超过100.0 mm的月份主要为7—9月，即降水主要集中于夏、秋季，占全年降水量的61.8%。其中，7月降水量最大（108.0 mm），占全年降水量的24.6%，并且有23 a均超过100.0 mm，有38 a为降水量最大月。对不同月份降水量进行M-K趋势检验（图2c），结果显示1—3月、8月、12月均呈不显著减少趋势，9月表现为显著增加趋势，其余月份均为不显著增加趋势。

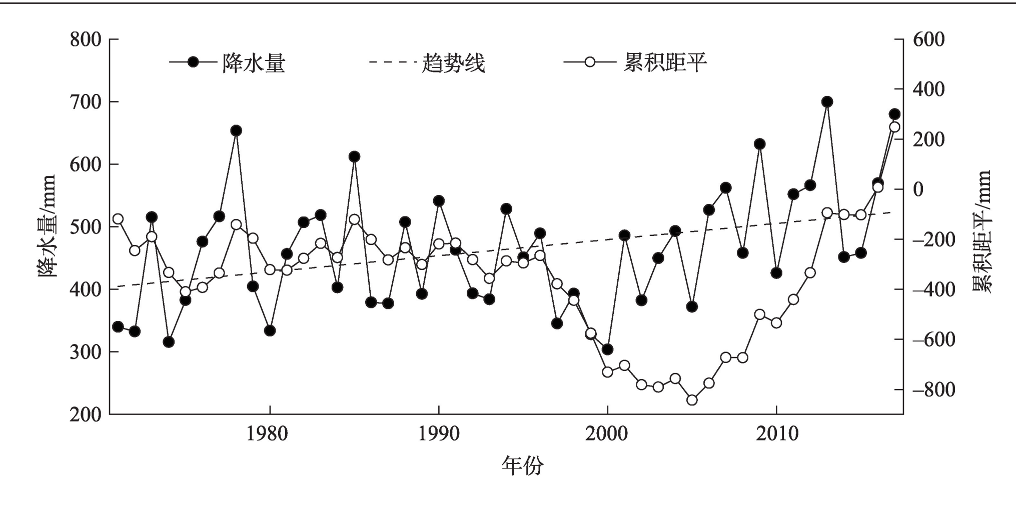



图1 1971—2017年大理河流域年降水量及其累积距平

Fig. 1 Annual precipitation and its accumulated anomalies in Dali River Basin during 1971—2017

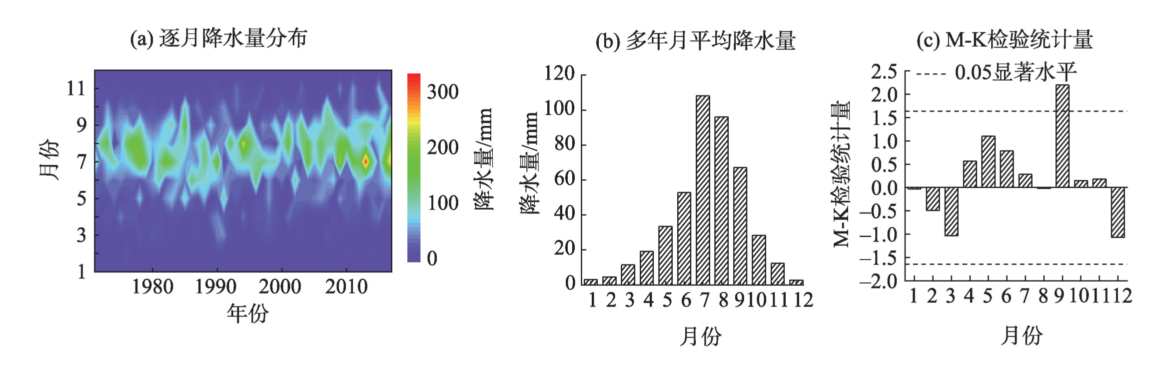


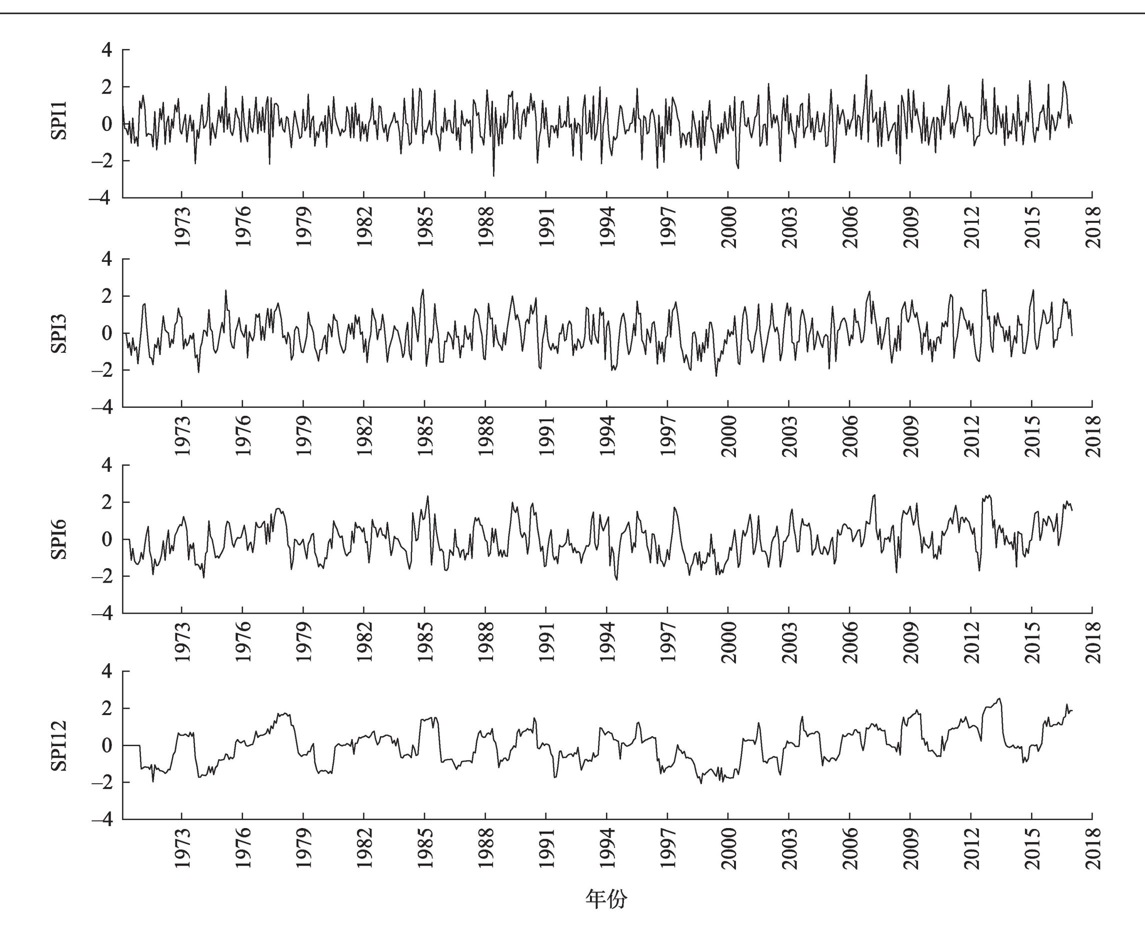

图2 1971—2017年大理河流域逐月降水量分布及其多年月平均降水量与M-K检验结果

Fig. 2 Distribution of monthly precipitation and its means and M-K detection in Dali River Basin during 1971—2017

## 2.2 SPI变化特征

**2.2.1 不同时间尺度SPI变化特征** 大理河流域1971—2017年不同时间尺度SPI时序变化过程见图3。不同时间尺度的SPI对降水变化的敏感性不同，短时间尺度SPI正负波动较大，且旱涝变化频率较快，对降水的响应较为明显，随着时间尺度的增大，SPI波动变小，旱涝变化频率减慢，对降水的敏感程度下降。如1994年8月、2013年7月以及2017年7—8月的暴雨降水在SPI1有明显的体现；同样，2001年3—7月降水稀少导致的干旱特征亦在SPI1有显著响应。相较于SPI1，SPI3不仅对旱涝发生时间敏感，而且可揭示年内季节旱涝变化，重旱和重涝及以上发生的频次分别为38次和36次，而SPI6反映的旱涝持续时间明显延长，重旱和重涝及以上发生的频次分别为27次和35次。从SPI12时序分布可知，典型洪涝年为1978、1986、2010、2013、2014年和2017年；同样，1972、1987年以及1997—2001年为干旱年，与葛彩莲等[26]在无定河流域的研究结论具有相似性。根据《陕西省干旱灾害年鉴》(1949—1995年)记载，陕西北部连续干旱天数达到300 d的年份有1965、1972、1987、1991年和1995年。SPI12反映的干旱情况与上述情况基本相符。随着时间尺度的增加，重旱和重涝以上发生的频次均呈减少趋势。以上分析说明SPI1和SPI3适用于短期气象旱涝特征的识别，而SPI6和SPI12对揭示区域长期旱涝影响及持续时间效果较好。因此，实现对旱涝的综合监测评估，需要多时间尺度的SPI综合应用。

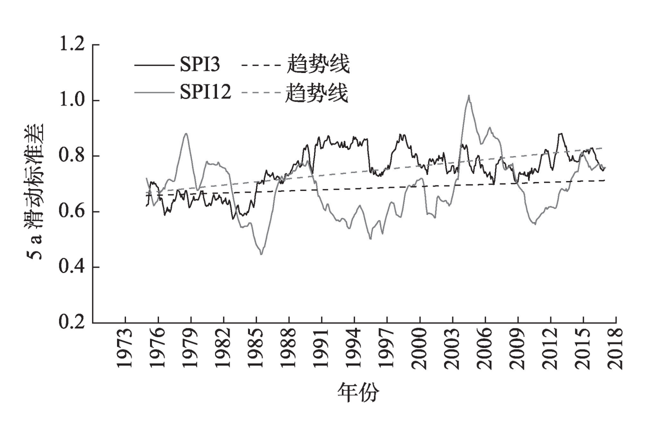
基于以上分析，选取短时间尺度SPI3和长时间尺度SPI12，计算其5 a滑动标准差，以表征近47 a大理河流域旱涝变化过程的时间变异性(图4)。SPI3和SPI12的时间变异性均呈显著增加趋势(通过0.05显著性水平检验)，最高值分别出现在2003年和2015年，其中SPI12增加趋势更明显，波幅也更大，但总体上SPI3的时间变异性更大，与图3中SPI时序变化过程特征相吻合。SPI的时间变异性增加




注：SPI1、SPI3、SPI6和SPI12分别表示时间尺度为1、3、6和12个月的标准化降水指数。

图3 1971—2017年大理河流域不同时间尺度SPI变化过程

Fig. 3 Evolution of the SPI at different time scales in Dali River Basin during 1971—2017




注：SPI3和SPI12分别表示时间尺度为3个月和12个月的标准化降水指数。

图4 1971—2017年大理河流域SPI3和SPI12的时间变异性

Fig. 4 Temporal variability of SPI3 and SPI12 in Dali River Basin during 1971—2017

表明旱涝过程之间的转换频率加快，进一步加剧了气候变化的不确定性[23]。

**2.2.2 SPI年际与季节变化特征** 1971—2017年大理河流域年SPI变化趋势见图5。年SPI波动幅度较大，总体上呈增加趋势，变化倾向率为0.21 $(10a)^{-1}$，M-K检验结果为2.71，通过0.05显著性水平检验。最大值为1.46（2017年），最小值为-1.55（2000年），干旱年和洪涝年出现的年数分别为14 a和13 a，未出现特旱和特涝。其中，轻旱、中旱、重旱出现的年数分别为10 a、3 a、1 a（表2），与王文亚[27]基于标准

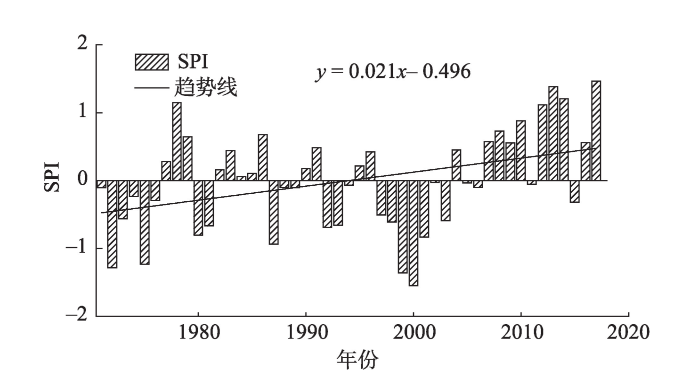



图5 1971—2017年大理河流域年SPI变化

Fig. 5 Change of annual SPI in Dali River Basin during 1971—2017

化流量指数(SDI)所得结论一致。年代变化上,20世纪70年代和90年代呈干旱化趋势,80年代总体较为平稳,2001年以来总体呈湿润化趋势,尤其在2011—2017年,湿润化速度更快(表3),这与孙智辉等[28]的2001年以来陕西黄土高原地区年度干旱强度有不同程度降低,史尚渝[29]的2000—2016年黄土高原整体呈湿润化趋势的结论基本一致。

不同季节SPI具有不同的变化趋势(图6)。除冬季呈微弱的下降趋势之外,其余季节均呈上升趋势。经M-K趋势检验,仅秋季通过0.05显著性水平检验,即秋季SPI在近47 a间显著增加,湿润化趋势明显。不同季节SPI旱涝等级频次分布存在差异(表2)。4个季节的干旱等级均以轻旱和中旱为主(21.2%~36.1%),春季和冬季各有一次特旱。夏、秋季发生干旱的频率最高,分别为36.0%和36.1%。年代变化上,不同季节SPI的变化趋势与幅度有所差别(表3)。春季SPI在20世纪70年代和90年代偏低,80年代偏高,2001年以来较为平稳,总体波动较小,变化倾向率为0.05 $(10a)^{-1}$;夏季与春季相似,除2011—2017年间偏高以外,其余年代变化较平稳,变化倾向率为0.14 $(10a)^{-1}$;秋季SPI在20世纪70—90年代均偏低,2000年以来偏高,尤其以2001—2007年最高,波动幅度较大,变化倾向率为0.27 $(10a)^{-1}$;冬季SPI在20世纪70年代和2001—2010年偏高,其余年代偏低,变化倾向率为-0.05 $(10a)^{-1}$。以上分析表明,尽管夏、秋季干旱化有所缓解,但对大理河流域干旱的影响依然较大。值得注意的是,冬季月降水序列中出现降水量为0的次数较多,可能对结果有一定影响。因此,有必要结合其他干旱指标对该流域做进一步的分析。

### 2.3 干旱事件持续时间变化特征

选取短时间尺度SPI3和长时间尺度SPI12,比较不同时间尺度干旱事件持续时间的变化特征(图7)。SPI3干旱事件持续时间的时序变化总体呈不显著的减少趋势(未通过0.05显著性水平检验),变化倾向率约为-0.11 $(10a)^{-1}$。5次滑动平均显示,干旱事件持续时间在20世纪70年代至80年代初期呈先下降后上升趋势,80年代和2006年以来较平稳,从90年代开始至2006年的波动幅度最大。近47 a大理河流域共发生87次干旱事件,持续时间在1~8个月之间,平均为2.10个月,持续时间最长的是1972年(8个月),其次为1998—1999年(7个月)。年代变化上,70年代最长为2.47个月,2011—2017年最短为1.67个月。SPI12干旱事件持续时间的时序变化与SPI3相似,总体亦呈不显著的减少趋势(M-K趋势检验未通过0.05显著水平),变化倾向率约为-1.17 $(10a)^{-1}$。5次滑动平均显示,干旱事件持续时间在20世纪80年代中期之前呈下降趋势,80年代中期至90年代中期较平稳,之后表现为先上升后下降的趋势。较之于SPI3,SPI12干旱事件仅有22次,但持续时间明显延长(1~33个月),平均为8.77个月,持续时间最长的是1998—2001年(33个月),其次为1974—1976年(24个月),其余均在20个月以下。由此可见,以SPI3和SPI12表征的干旱事件持续时间整体变化趋势基本一致,但SPI12干旱事件平均持续时间、最大持续时间以及减少速率均大于SPI3,这与张利利等[1]在石羊河流域所得出的结论一致。另外,对李家河站水文干旱事件的研究表明,70年代以前的干旱历时主要为4~8个月,干旱烈度小于5;70年代以后的干旱历时有加长的趋势,其中2000—2002年的干旱事件最长达到连续36个月,最严重时的干旱烈度达到15.8,发生在2000年[27]。这与本研究中的干旱事件大致相同,但持续时间相对更长。

### 2.4 极端降水与干旱的关系

已有研究表明,SPI对降水量级具有较高的敏感性[30],分析极端降水对干旱的影响具有重要意义。分别对4个水文站的月降水量、月最大日降水

表2 年与季节不同干旱等级频次及频率统计

Tab. 2 Times and frequency statistics of annual and seasonal drought classification

| 干旱等级 | 春季 | | 夏季 | | 秋季 | | 冬季 | | 全年 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 频次/次 | 频率/% | 频次/次 | 频率/% | 频次/次 | 频率/% | 频次/次 | 频率/% | 频次/次 | 频率/% |
| 轻旱 | 8 | 17.0 | 10 | 21.2 | 8 | 17.0 | 5 | 10.6 | 10 | 21.3 |
| 中旱 | 2 | 4.3 | 6 | 12.7 | 8 | 17.0 | 5 | 10.6 | 3 | 6.4 |
| 重旱 | 2 | 4.3 | 1 | 2.1 | 1 | 2.1 | 2 | 4.3 | 1 | 2.1 |
| 特旱 | 1 | 2.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2.1 | 0 | 0 |

表3　年与季节SPI年代变化

Tab. 3　Decadal change of annual and seasonal SPI

| 年代 | SPI | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 全年 |
| 1971—1980年 | -0.30 | -0.18 | -0.29 | 0.31 | -0.24 |
| 1981—1990年 | 0.33 | 0.13 | -0.28 | -0.13 | -0.02 |
| 1991—2000年 | -0.24 | -0.38 | -0.44 | -0.35 | -0.43 |
| 2001—2010年 | 0.08 | 0.04 | 0.32 | 0.33 | 0.16 |
| 2011—2017年 | 0.04 | 0.62 | 0.97 | -0.25 | 0.77 |
| 变化倾向率/(10a)$^{-1}$ | 0.05 | 0.14 | 0.27 | -0.05 | 0.21 |

量以及各月日降水量≥0.1 mm天数时间序列数据进行M-K趋势检验。用月最大日降水量和月总降水量之比(Rmax/Rtotal)表示降水的集中程度。以李家河站为例，研究了日降水量≥0.1 mm天数与Rmax/Rtotal的关系、SPI1与Rmax/Rtotal的关系(图8)。M-K趋势检验结果表明：各站点仅9月的降水量通过0.05显著性水平检验，表现为显著增加趋势，与2.1部分中整个流域的月降水量变化趋势相一致，说明9月(秋季)SPI增大与降水量总体增加有关。对

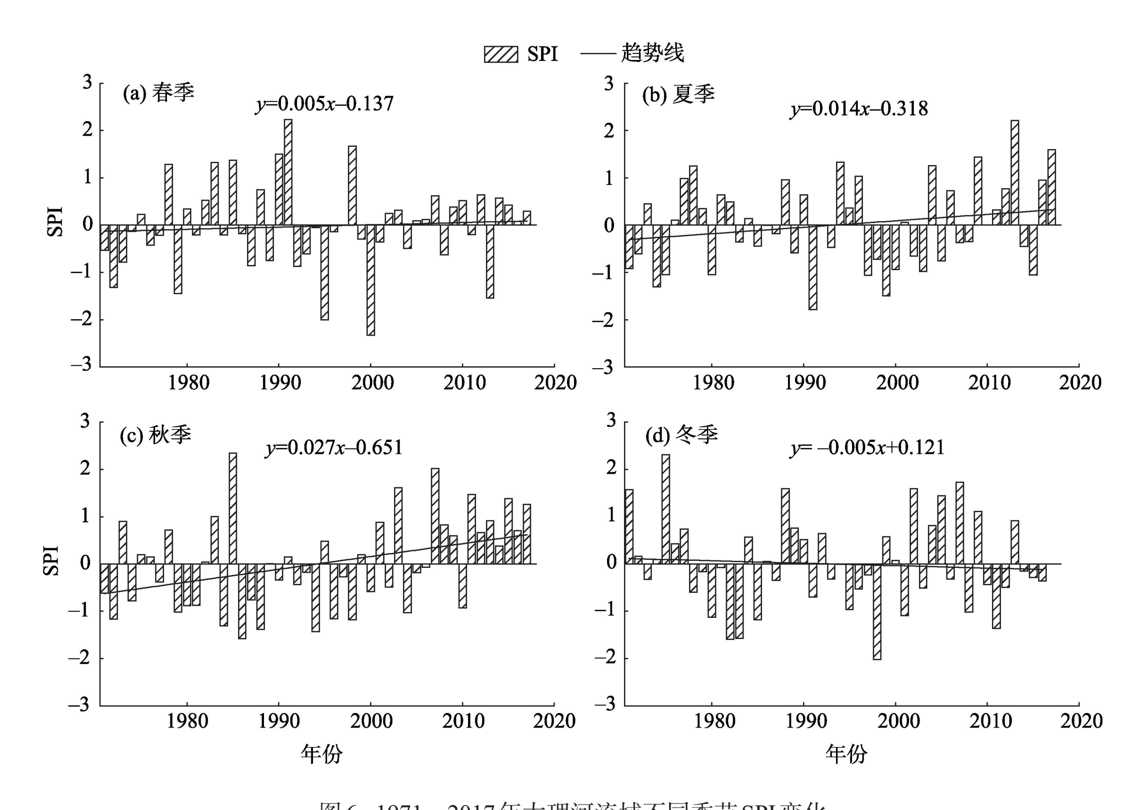



图6　1971—2017年大理河流域不同季节SPI变化

Fig. 6　SPI change in different seasons in Dali River Basin during 1971—2017

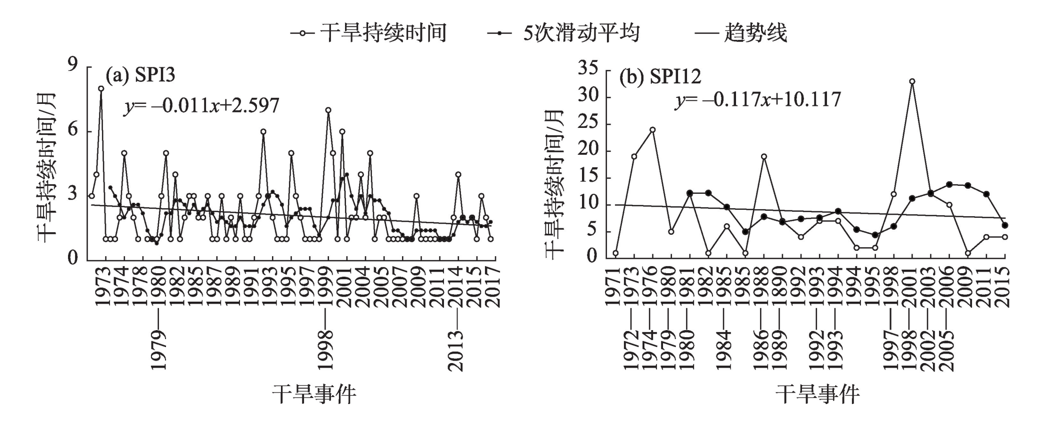
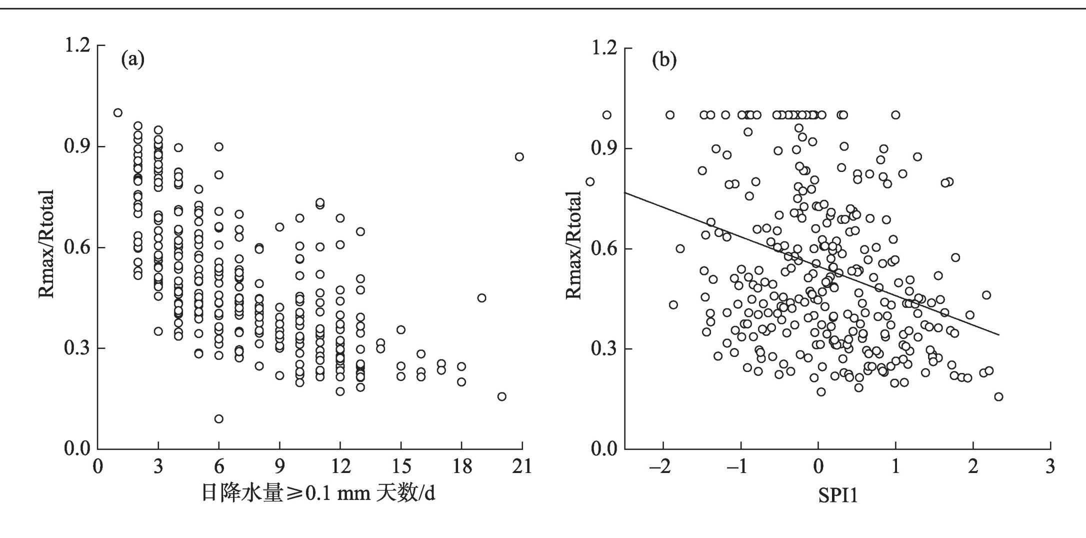



图7　1971—2017年大理河流域SPI3和SPI12干旱事件持续时间变化

Fig. 7　Change of SPI3 and SPI12 drought events duration in Dali River Basin during 1971—2017




注：Rmax/Rtotal表示月最大日降水量和月总降水量之比。

图8　李家河站各月日降水量≥0.1 mm天数、SPI1与Rmax/Rtotal的关系

Fig. 8　Relationship between the days of daily precipitation ≥0.1 mm, SPI1 and Rmax/Rtotal at Lijiahe station

于月最大日降水量，李家河站和青阳岔站分别在6、7月呈显著增加趋势，曹坪站在6月和9月显著增加，全年尺度下未发现任何站点存在显著的趋势性变化。各站点11月—次年4月日降水量≥0.1 mm天数的M-K检验统计值均为负值，表现为下降趋势，但仅12月份出现较为明显的下降趋势，其中曹坪站和李家河站分别通过0.05和0.1显著性水平检验，而5—10月均为正值，但增加趋势不明显。全年尺度下，除李家河站日降水量≥0.1 mm天数有不显著增加趋势外，其余站点均表现为不显著的下降趋势。图8a显示，日降水量≥0.1 mm天数越少，月最大日降水量在月总降水量中所占比例越高（Rmax/Rtotal越大），即降水总体更加集中于一场强降水中[17]。而SPI1与Rmax/Rtotal之间存在负相关关系，Rmax/Rtotal越大，即降水越集中，SPI1越小，干旱越严重（图8b）。刘可晶等[17]研究发现淮河流域的日降水量≥0.1 mm天数总体呈显著下降趋势，发生气象干旱的可能性增加。然而，本研究中各站点日降水量≥0.1 mm天数的变化趋势并不显著，这说明大理河流域在近47 a发生干旱的可能性并未明显增加。

为进一步分析典型极端降水事件与干旱的关系，将日降水量50 mm作为阈值，出现大于该阈值的降水即为极端降水。以曹坪站为例，选取16次极端降水事件，对应的年份和旱涝等级见表4。除1972年和1981年分别出现中旱和轻旱外，其余年份均表现为正常和偏涝。相关分析表明，年SPI与最大日降水量呈微弱的正相关，Pearson相关系数为0.32。这表明极端降水可能会降低干旱发生的概率，且随着最大日降水量的增加，干旱发生的概率可能更低。

**表4　典型极端降水事件与干旱的关系**

**Tab. 4　Relationship between extreme precipitation events and drought**

| 年份 | 最大日降水量/mm | 年SPI | 旱涝等级 |
|---|---|---|---|
| 1972 | 68.9 | −1.286 | 中旱 |
| 1974 | 77.1 | −0.234 | 正常 |
| 1977 | 82.3 | 0.280 | 正常 |
| 1978 | 97.9 | 1.149 | 中涝 |
| 1979 | 77.9 | 0.644 | 轻涝 |
| 1981 | 52.0 | −0.669 | 轻旱 |
| 1982 | 57.0 | 0.156 | 正常 |
| 1984 | 59.9 | 0.057 | 正常 |
| 1988 | 55.3 | −0.101 | 正常 |
| 1989 | 71.2 | −0.106 | 正常 |
| 2006 | 96.6 | −0.101 | 正常 |
| 2009 | 75.8 | 0.554 | 轻涝 |
| 2010 | 66.8 | 0.879 | 轻涝 |
| 2013 | 50.8 | 1.384 | 中涝 |
| 2014 | 54.8 | 1.208 | 中涝 |
| 2017 | 139.0 | 1.465 | 中涝 |

## 3　结　论

基于标准化降水指数（SPI）方法，对1971—

2017年大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的联系进行了分析，得出以下结论：

（1）近47 a大理河流域年降水量呈显著增加趋势，不同月份降水量的变化趋势具有较大差异。不同时间尺度SPI对降水量变化的敏感程度不同，SPI1和SPI3适用于短期气象旱涝特征的识别，而SPI6和SPI12对揭示区域长期旱涝影响及持续时间效果较好。SPI3和SPI12的时间变异性均呈显著增加趋势。

（2）年际和春、夏、秋季SPI呈不同程度的增加趋势，2001年以来最为明显，冬季呈微弱的下降趋势，春、夏、秋、冬季的变化倾向率分别为0.05 $(10a)^{-1}$、0.14 $(10a)^{-1}$、0.27 $(10a)^{-1}$、−0.05 $(10a)^{-1}$。不同季节干旱等级均以轻旱和中旱为主（21.2%~36.1%），夏、秋季发生干旱的频率最高。

（3）短时间尺度（SPI3）与长时间尺度（SPI12）干旱事件持续时间均呈不显著的减少趋势，变化倾向率分别为−0.11 $(10a)^{-1}$和−1.17 $(10a)^{-1}$，但SPI12干旱事件平均持续时间、最长持续时间以及下降速度均大于SPI3。

（4）降水集中程度增大会导致SPI1减小，增加干旱发生的可能性。极端降水可能会降低干旱发生的概率，且随着最大日降水量的增加，干旱发生的概率可能会更低。

## 参考文献（References）


[1] 张利利, 周俊菊, 张恒玮, 等. 基于SPI的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 996−1007. [Zhang Lili, Zhou Junju, Zhang Hengwei, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on precipitation index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 996−1007. ]

[2] 邹磊, 余江游, 夏军, 等. 基于SPEI的渭河流域干旱时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 329−338. [Zou Lei, Yu Jiangyou, Xia Jun, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in the Weihe River Basin based on SPEI[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 329−338. ]

[3] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1908−1919. [Hu Ziying, Zhou Junju, Zhang Lili, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1908−1919. ]

[4] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58 a演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50−59. [Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Li Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 50−59. ]

[5] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523−529. [Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(4): 523−529. ]

[6] Tate E L, Gustard A. Drought definition: A hydrological perspective[C]//Vogt J V, Somma F. Drought and Drought Mitigation in Europe. Dordrecht: Kluwer, 2000: 23−48.

[7] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: The role of definition[J]. Water International, 1985, 10: 111−120.

[8] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16−18. [Zhai Panmao, Zou Xukai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1): 16−18. ]

[9] 冯冬蕾, 程志刚, 赵雷, 等. 4种干旱判别指数在东北地区适用性分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 371−379. [Feng Donglei, Cheng Zhigang, Zhao Lei, et al. Applicability analysis of four drought indexes in northeast China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 371−379. ]

[10] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 61−67. [Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Zhou Yuewu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 61−67. ]

[11] 陈莹, 陈兴伟. 福建省近50年旱涝时空特征演变——基于标准化降水指数分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 57−63. [Chen Ying, Chen Xingwei. Evolution of spatiotemporal characteristics of flood and drought in Fujan Province for recent 50 years: An SPI-based analysis[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 57−63. ]

[12] 蔡哲, 章毅之, 何拥凤, 等. 江西省干旱洪涝的时空变化特征分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 144−149. [Cai Zhe, Zhang Yizhi, He Yongfeng, et al. Analysis of spatiotemporal trend characteristics of droughts and floods in Jiangxi Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(2): 144−149. ]

[13] GB/T 20481−2006. 中华人民共和国标准: 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [GB/T 20481−2006. National standard of the People's Republic of China: Grades of meteorological drought[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. ]

[14] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales[C]//Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim CA: American Meteorological Society, 1993: 179−186.

[15] Seiler R A, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(11): 1365−1376.

[16] 翟禄新, 冯起. 基于SPI的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847−857. [Zhai Luxin, Feng Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847−857. ]

[17] 刘可晶, 王文, 朱烨, 等. 淮河流域过去60年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1179−1187. [Liu Kejing, Wang Wen, Zhu Ye, et al. Trend of drought and its relationship with extreme precipitation in Huaihe River Basin over the last 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1179−1187. ]

[18] 陶新娥, 陈华, 许崇育, 等. 基于SPI/SPEI指数的汉江流域1961—2014年干旱变化特征分析[J]. 水资源研究, 2015, 4(5): 404−415. [Tao Xin'e, Chen Hua, Xu Chongyu, et al. Characteristics of drought variations in Hanjiang Basin in 1961—2014 based on SPI/SPEI[J]. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(5): 404−415. ]

[19] 王跃峰, 陈兴伟, 陈莹. 基于多时间尺度SPI的闽江流域干湿变化与洪旱事件识别[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 52−57. [Wang Yuefeng, Chen Xingwei, Chen Ying. Based on multiple time scales of SPI dry/wet conditions variation and identification of flood and drought events in Minjiang River of Fujian[J]. Mountain Research, 2014, 32(1): 52−57. ]

[20] 黄生志, 黄强, 王义民, 等. 基于SPI的渭河流域干旱特征演变研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 15−22. [Huang Shengzhi, Huang Qiang, Wang Yimin, et al. Evolution of drought characteristics in the Weihe River Basin based on standardized precipitation index[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 15−22. ]

[21] 叶柏松, 赵成义, 姜逢清, 等. 近300 a来塔里木河流域旱涝灾害特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 173−182. [Ye Baisong, Zhao Chengyi, Jiang Fengqing, et al. Characteristics of the flood and drought disasters in the Tarim River Basin in recent 300 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 173−182. ]

[22] Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, et al. Indicators of climate change for the Russian federation[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 219−242.

[23] Vicente-Serrano S M, Cuadrat J M. Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE Spain) during the second half of the twentieth century[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 88: 247−258.

[24] 于家瑞, 艾萍, 袁定波, 等. 基于SPI的黑龙江省干旱时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1059−1068. [Yu Jiarui, Ai Ping, Yuan Dingbo, et al. Spatial-temporal characteristics of drought in Heilongjiang Province based on standardized precipitation index[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1059−1068. ]

[25] 肖名忠, 张强, 陈小宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 83−92. [Xiao Mingzhong, Zhang Qiang, Chen Xiaohong. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 83−92. ]

[26] 葛彩莲, 蔡焕杰, 康艳. 无定河流域气象干旱计算与分析[C]//中国农业工程学会农业水土工程专业委员会, 云南农业大学水利水电与建筑学院. 现代节水高效农业与生态灌区建设(下). 昆明: 云南大学出版社, 2010: 138−146. [Ge Cailian, Cai Huanjie, Kang Yan. Calculation and analysis of meteorological drought in the Wuding River[C]//Agricultural Soil and Water Engineering Specialized Committee, Chinese Society of Agricultural Engineering, College of Water Conservancy, Hydropower and Architecture, Yunnan Agricultural University. Modern Water-saving and Efficient Agriculture and Construction of Ecological Irrigated Areas. Kunming: Yunnan University Press, 2010: 138−146. ]

[27] 王文亚. 变化环境下无定河流域水文干旱演变规律及驱动机制分析[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017. [Wang Wenya. Evolution and driving mechanism of hydrologic drought in Wuding River Basin under changing environment[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017. ]

[28] 孙智辉, 王治亮, 曹雪梅, 等. 基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区1971—2010年干旱变化特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1560−1567. [Sun Zhihui, Wang Zhiliang, Cao Xuemei, et al. Characteristics of drought change in the Loess Plateau area of Shaanxi based on the standardized precipitation index during 1971—2010[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1560−1567. ]

[29] 史尚渝. 黄土高原气象干旱时空变化及其对植被的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019. [Shi Shangyu. Temporal and spatial variation of meteorological drought and vegetation vulnerability to drought on Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Centre of Soil and Water Conservation & Eco-environment, CAS, EM), 2019. ]

[30] 叶正伟. 基于SPI的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析——以盐城市为例[J]. 地理科学, 2014, 34(4): 479−487. [Ye Zhengwei. Flood and drought change based SPI analysis in the developing coastal region of Jiangsu Province: A case study in Yancheng City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 479−487. ]

# Variation characteristics of drought and its relationship with the extreme precipitation in Dali River Basin

QIU Dexun[1,2], MU Xingmin[1,2,3], YIN Diansheng[4], GAO Peng[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. China Water Huaihe Planning Design and Research Co. , Ltd. , Hefei 230601, Anhui, China)

**Abstract:** The Dali River Basin is located in northwest China and is a typical fragile ecosystem area. This region is extremely sensitive to climatic changes, and monitoring these changes can therefore provide an important basis for decreasing the losses bought about by drought disasters. On the basis of the standard precipitation index (SPI), the variation in drought characteristics and their relationship with extreme precipitation events in the Dali River Basin from 1971 to 2017 were analyzed. The main results of this study suggest that (1) the annual precipitation initially showed an increasing trend (from 1971 to the early 1990s) and fluctuated before the mid-1990s before it decreased and then increased. The precipitation in the months from January to March, August, and December showed a downward trend, whereas the precipitation in the other months showed an upward trend, which was particularly notable for the month of September. SPI1 and SPI3 were suitable for identifying short-term meteorological drought and flood characteristics, whereas SPI6 and SPI2 were suitable for revealing the long-term impact and duration of regional droughts and floods. Temporal variations in the SPI (particularly SPI3 and SPI12) increased significantly. (2) However, the trend of the SPI and the frequency of drought grade differed through the seasons. In winter, there was a definite downward trend, whereas in the other seasons the trend was an increasing one, particularly in autumn. The interannual SPI fluctuated greatly, showing an increasing trend overall, particularly since 2001. Light drought and moderate drought were the predominant drought grades (21.2%−36.1%), and the frequency of drought in summer and autumn was the highest. (3) The average duration, longest duration, and descending speed of drought events at a long time scale were higher than those at a short time scale. In addition, the frequency of days with daily precipitation ⩾0.1 mm was not significantly changed over the study duration, which indicates that the possibility of drought had not increased significantly in the Dali River Basin over the 47-year-range studied. (4) The increase in the precipitation concentration (Rmax/Rtotal) will lead to a decrease in SPI1 and will increase the possibility of drought. By contrast, an extreme precipitation will reduce the probability of drought. With the increase in the maximum daily precipitation (>50 mm), the annual SPI increased and reduced the possibility of drought.

**Key words:** precipitation; drought; standard precipitation index (SPI); Dali River Basin